

Artículo Revisión

Microencapsulación de extractos vegetales ricos en compuestos fenólicos mediante secado por aspersión: evaluación de la eficiencia de encapsulación y estabilidad antioxidante

Microencapsulation of Plant Extracts Rich in Phenolic Compounds by Spray Drying: Evaluation of Encapsulation Efficiency and Antioxidant Stability

Diego Hernán Tobar Pérez^{1*}  ,

¹Universidad técnica de Ambato, Ambato – Ecuador

*Autor de correspondencia: Diego Hernán Tobar Pérez 

Recibido: 15-08-2026

Revisado: 22-08-2026

Aceptado: 29-08-2026

Publicado: 05-09-2026

Cómo citar este artículo: Tobar Pérez, D. H. . (2026). Microencapsulación de extractos vegetales ricos en compuestos fenólicos mediante secado por aspersión: evaluación de la eficiencia de encapsulación y estabilidad antioxidante. *Star of Sciences Multidisciplinary Journal*, 3(2), 1-14. <https://doi.org/10.63969/x0a8gb81>

RESUMEN

Los extractos vegetales constituyen una fuente relevante de compuestos fenólicos con actividad antioxidante y potencial de aplicación en los sectores alimentario, nutracéutico y farmacéutico. Sin embargo, su estabilidad puede verse comprometida por factores como la temperatura, la luz, el oxígeno, la humedad y el pH, favoreciendo procesos de oxidación y degradación que reducen sus propiedades funcionales. El estudio analiza los principales factores asociados con la microencapsulación de extractos vegetales ricos en compuestos fenólicos mediante secado por aspersión, considerando su incidencia en la eficiencia de encapsulación y la conservación de la actividad antioxidante. Se desarrolla bajo un enfoque cualitativo, descriptivo y documental, con aplicación de los lineamientos PRISMA 2020 para la organización del proceso de revisión. El análisis permite identificar que las características del extracto, la composición del material encapsulante y las condiciones de secado influyen en la retención de los compuestos fenólicos y en la estabilidad antioxidante. La microencapsulación favorece la protección de estos compuestos y contribuye a conservar sus propiedades funcionales.

Palabras clave: compuestos fenólicos; microencapsulación; secado por aspersión; eficiencia de encapsulación; actividad antioxidante.

ABSTRACT

Plant extracts represent a valuable source of phenolic compounds with antioxidant activity and potential applications in the food, nutraceutical and pharmaceutical sectors. However, their stability can be compromised by factors such as temperature, light, oxygen, moisture and pH, which may promote oxidation and degradation processes that reduce their functional properties. This study analyses the main factors associated with the microencapsulation of plant extracts rich in phenolic compounds through spray drying, considering their influence on encapsulation efficiency and the preservation of antioxidant activity. The study adopts a qualitative, descriptive and documentary approach, applying the PRISMA 2020 guidelines to structure the review process. The analysis identifies that extract characteristics, encapsulating material composition and drying conditions influence the retention of phenolic compounds and antioxidant stability. Microencapsulation enhances the protection of these compounds and contributes to preserving their functional properties.

Keywords: phenolic compounds; microencapsulation; spray drying; encapsulation efficiency; antioxidant activity.

1. INTRODUCCIÓN

Los extractos vegetales constituyen una fuente importante de sustancias bioactivas, entre las cuales los compuestos fenólicos destacan por su participación en procesos vinculados con la actividad antioxidante. Dentro de este grupo se encuentran los flavonoides, ácidos fenólicos, taninos y otros metabolitos secundarios que han adquirido relevancia en la investigación científica por sus posibles aplicaciones en las industrias alimentaria, farmacéutica y nutracéutica. Sin embargo, el aprovechamiento de estos compuestos presenta ciertas limitaciones debido a su susceptibilidad frente a factores ambientales y fisicoquímicos, como la temperatura, la exposición a la luz, el oxígeno, la humedad y el pH. Estas condiciones pueden favorecer reacciones de oxidación y degradación que modifican sus características químicas y disminuyen su actividad biológica. Esta situación ha generado la necesidad de desarrollar alternativas tecnológicas capaces de preservar la integridad de los compuestos fenólicos y favorecer su incorporación estable en diferentes productos y matrices.

Entre las estrategias orientadas a mejorar la conservación de sustancias bioactivas, la microencapsulación mediante secado por aspersión representa una alternativa de especial interés debido a su capacidad para incorporar extractos vegetales en matrices protectoras y obtener productos secos de mayor facilidad de manipulación y almacenamiento. El proceso comprende la atomización de una alimentación líquida constituida por el extracto y uno o varios agentes encapsulantes, seguida de una rápida eliminación del solvente mediante una corriente de aire caliente, con la consecuente formación de partículas que contienen los compuestos de interés protegidos dentro de la matriz encapsulante. El comportamiento del proceso está determinado por factores como la composición química del extracto, las características del material encapsulante y las condiciones operativas empleadas durante el secado. En consecuencia, la evaluación de la eficiencia de encapsulación junto con la conservación de la actividad antioxidante permite determinar con mayor precisión la capacidad protectora del procedimiento y establecer en qué medida la microencapsulación contribuye a preservar las propiedades funcionales de los compuestos fenólicos durante el almacenamiento.

A pesar del creciente reconocimiento de los extractos vegetales como fuentes naturales de compuestos fenólicos, su aprovechamiento tecnológico permanece condicionado por la limitada estabilidad de estas sustancias. Durante las etapas de obtención, procesamiento y almacenamiento, los compuestos fenólicos pueden verse afectados por procesos de oxidación, degradación térmica y modificaciones químicas que alteran su integridad molecular y reducen progresivamente su capacidad antioxidante. Estas transformaciones pueden ocasionar una disminución en la concentración de sustancias bioactivas y, en consecuencia, limitar el potencial funcional de los extractos vegetales. Esta condición adquiere particular importancia cuando estos componentes se destinan a productos alimentarios, nutracéuticos o farmacéuticos, en los cuales se requiere mantener de forma consistente sus propiedades fisicoquímicas y biológicas durante las diferentes etapas de elaboración y conservación.

Ante estas limitaciones, resulta necesario examinar alternativas tecnológicas orientadas a incrementar la protección de los compuestos fenólicos sin afectar sustancialmente sus propiedades funcionales. El secado por aspersión representa una opción de interés debido a su capacidad para incorporar sustancias bioactivas en matrices encapsulantes y transformarlas en productos pulverulentos con mejores características para su manipulación y conservación. Sin embargo, el comportamiento del proceso puede variar en función de la composición del extracto vegetal, las propiedades del material encapsulante y los parámetros operativos empleados durante el secado. La interacción entre estos factores influye directamente en la cantidad de compuestos fenólicos retenidos y en el grado de conservación de su capacidad antioxidante. Por consiguiente, la evidencia científica requiere ser examinada de manera integrada para reconocer los factores que favorecen una mayor eficiencia de encapsulación y una adecuada estabilidad antioxidante de los extractos vegetales sometidos a este procedimiento.

Los compuestos fenólicos presentes en diversas especies vegetales constituyen una fuente de sustancias bioactivas de considerable interés por las propiedades antioxidantes asociadas con determinadas estructuras químicas. Frutas, hortalizas, plantas aromáticas y medicinales, además de distintos subproductos agroindustriales, contienen cantidades

variables de polifenoles que pueden ser aprovechados mediante procesos de extracción y concentración. Bas (2026) señala que estos componentes han adquirido particular importancia en el desarrollo de productos funcionales, debido a su potencial incorporación en aplicaciones alimentarias, nutraceuticas y farmaceuticas. Sin embargo, la composición y concentración de los compuestos fenólicos no son constantes, ya que pueden estar condicionadas por factores como la especie vegetal, la variedad, las condiciones de cultivo, el grado de madurez y las características del procesamiento. Esta variabilidad hace necesario considerar las particularidades de cada fuente vegetal al momento de obtener, caracterizar y estabilizar sus extractos bioactivos.

La obtención de extractos con elevada concentración de compuestos fenólicos depende, en gran medida, de las condiciones bajo las cuales se desarrolla el proceso de extracción. Variables como la naturaleza del solvente, la temperatura, el tiempo de contacto y la relación entre la materia vegetal y el medio extractor pueden modificar la cantidad y composición de las sustancias recuperadas. Rabanal et al. (2021) evidenciaron, en su revisión sobre antocianinas procedentes de diferentes fuentes vegetales, que las condiciones de extracción influyen en la recuperación de compuestos bioactivos y deben considerarse conjuntamente con las etapas posteriores de estabilización. Por tanto, la calidad del extracto inicial constituye un factor determinante para definir su comportamiento durante los procesos destinados a su conservación.

La susceptibilidad de los polifenoles frente a determinadas condiciones ambientales ha favorecido la incorporación de tecnologías orientadas a su protección. La exposición al oxígeno, la temperatura, la luz y otros factores fisicoquímicos puede acelerar procesos de degradación que afectan la concentración y las propiedades funcionales de estos compuestos. Jayaprakash et al. (2023) destacaron que la encapsulación constituye una estrategia relevante para reducir la exposición de los compuestos bioactivos a condiciones desfavorables y favorecer su conservación. Desde esta perspectiva, la formación de una estructura protectora alrededor del material activo permite modificar su interacción con el entorno y generar condiciones más favorables para su almacenamiento y utilización posterior.

Entre las tecnologías disponibles para la encapsulación de sustancias bioactivas, el secado por aspersión ha adquirido una posición destacada por su rapidez, versatilidad y posibilidades de escalamiento. El procedimiento permite transformar una alimentación líquida en partículas secas mediante atomización y evaporación del solvente, generando una matriz en la que pueden quedar incorporados los compuestos de interés. Díaz (2023) destacan que las tecnologías basadas en aspersión han recibido creciente atención debido a su capacidad para trabajar con diferentes sistemas de alimentación y producir partículas con características controlables. En el caso de los compuestos fenólicos, esta alternativa resulta particularmente relevante porque permite combinar la deshidratación del extracto con su incorporación en una estructura destinada a mejorar su estabilidad.

La selección del material encapsulante constituye uno de los factores que mayor influencia puede ejercer sobre las características finales de las partículas obtenidas mediante secado por aspersión. Diferentes carbohidratos, gomas, proteínas y combinaciones de polímeros han sido estudiados como matrices protectoras debido a sus distintas propiedades de solubilidad, formación de película, interacción con los compuestos bioactivos y comportamiento durante el secado. Buljeta et al. (2022) establece que la naturaleza y composición del material de pared pueden modificar aspectos como el rendimiento del proceso, la eficiencia de encapsulación, la morfología de las partículas y su estabilidad. Por consiguiente, la elección del encapsulante debe guardar correspondencia con las propiedades del extracto y con las características que se pretende alcanzar en el producto final.

La eficiencia de encapsulación constituye un indicador fundamental para determinar la capacidad de una formulación para retener los compuestos bioactivos dentro de la matriz protectora. Este parámetro permite relacionar la cantidad de sustancia efectivamente incorporada en las partículas con la cantidad presente en el sistema inicial, proporcionando información sobre el desempeño del proceso. Fonseca et al. (2023) señalan que la eficiencia obtenida durante la microencapsulación de compuestos fenólicos está condicionada por las propiedades del material activo, el tipo y proporción del agente encapsulante y las variables de procesamiento. Por ello, una elevada eficiencia de encapsulación

representa un resultado favorable, pero debe interpretarse conjuntamente con las características fisicoquímicas y funcionales del producto obtenido.

La conservación de la actividad antioxidante constituye otro criterio esencial para valorar el desempeño de la microencapsulación, debido a que la retención física de los compuestos no garantiza por sí misma la preservación de su funcionalidad. Durante el procesamiento y almacenamiento pueden producirse transformaciones químicas capaces de disminuir la capacidad antioxidante, incluso cuando una proporción considerable de los compuestos permanece presente en la matriz. Rios et al. (2021) encontraron que la microencapsulación mediante secado por aspersión puede favorecer la estabilidad de determinados compuestos vegetales y alcanzar elevados niveles de eficiencia de encapsulación, aunque el comportamiento depende de la combinación entre materia prima, agente encapsulante y condiciones de procesamiento. En consecuencia, la evaluación de la actividad antioxidante antes y después de la encapsulación proporciona información complementaria sobre el nivel de protección alcanzado.

La efectividad de la microencapsulación de extractos vegetales ricos en compuestos fenólicos mediante secado por aspersión está determinada por la interacción entre las propiedades del material bioactivo, la composición de la matriz encapsulante y las condiciones aplicadas durante el procesamiento. Dos Santos et al. (2024) destacan que la valoración de este procedimiento debe considerar de manera conjunta las características del material de pared, los parámetros operativos y las propiedades fisicoquímicas de las partículas obtenidas, debido a su influencia sobre la retención y conservación de los compuestos antioxidantes. Desde esta perspectiva, la eficiencia de encapsulación constituye una dimensión relevante, pero no suficiente para establecer el desempeño del proceso, debido a que una elevada retención inicial no implica necesariamente una conservación prolongada de la actividad antioxidante. Por consiguiente, la valoración integrada de la eficiencia de encapsulación y la estabilidad antioxidante permite determinar con mayor rigor la capacidad protectora del secado por aspersión y los factores que favorecen la preservación de las propiedades funcionales de los extractos fenólicos.

Los compuestos fenólicos comprenden un conjunto diverso de metabolitos secundarios presentes en numerosas especies vegetales y caracterizados químicamente por la presencia de estructuras aromáticas asociadas con grupos hidroxilo. Entre sus principales categorías se encuentran los ácidos fenólicos, flavonoides, estilbenos, lignanos y taninos, cuyas diferencias estructurales determinan propiedades químicas y biológicas particulares. Liga et al. (2023) señalan que la diversidad molecular de los flavonoides, por ejemplo, se relaciona con su capacidad para participar en diferentes mecanismos biológicos y antioxidantes. En consecuencia, la composición cualitativa y cuantitativa de un extracto vegetal determina en buena medida su comportamiento funcional y su potencial de aprovechamiento como fuente de sustancias bioactivas.

La capacidad antioxidante atribuida a los extractos vegetales deriva de la acción conjunta de diversos compuestos capaces de intervenir en procesos asociados con la generación y neutralización de especies reactivas. Los mecanismos involucrados pueden incluir la transferencia de electrones o átomos de hidrógeno, la estabilización de radicales y la interacción con determinadas rutas de oxidación. Hernández et al. (2022) plantean que la actividad antioxidante de los alimentos de origen vegetal depende tanto de la naturaleza de sus componentes fenólicos como de sus concentraciones y de las interacciones establecidas entre ellos. Por esta razón, la capacidad antioxidante de un extracto no debe atribuirse exclusivamente a un compuesto individual, sino interpretarse como una propiedad resultante de la composición global de la matriz y de las condiciones utilizadas para su evaluación.

La necesidad de conservar las propiedades de sustancias bioactivas sensibles ha favorecido el empleo de tecnologías de encapsulación capaces de establecer una separación física entre el compuesto activo y el entorno. La microencapsulación consiste en incorporar una sustancia de interés dentro de una matriz o estructura protectora que puede modificar su exposición frente a factores externos y facilitar su posterior utilización. Pino et al. (2021) describen la encapsulación como una estrategia aplicable a diversos componentes bioactivos para mejorar su protección, manipulación y estabilidad. En los extractos vegetales, este procedimiento puede contribuir a disminuir el contacto de

los compuestos fenólicos con oxígeno, humedad, luz y otras condiciones capaces de acelerar su deterioro, favoreciendo así su conservación durante las etapas posteriores de procesamiento y almacenamiento.

El secado por aspersión constituye una de las tecnologías empleadas para obtener partículas secas a partir de sistemas líquidos que contienen sustancias de interés y materiales protectores. El procedimiento comprende la atomización de la alimentación en pequeñas gotas, seguida de una rápida transferencia de calor y masa que favorece la eliminación del solvente y la formación de partículas sólidas. Damián et al. (2025) destacan que esta tecnología presenta ventajas relacionadas con su rapidez, versatilidad y posibilidad de aplicación a escala industrial, aunque las características del producto final dependen de las condiciones utilizadas durante el procesamiento. En consecuencia, variables como la temperatura del aire, la velocidad de alimentación, la concentración de sólidos y las características de atomización pueden modificar la morfología, humedad y estabilidad de las partículas obtenidas.

La selección de la matriz encapsulante constituye un elemento determinante en la protección de los compuestos fenólicos durante el secado y la conservación posterior. Entre los materiales utilizados se encuentran carbohidratos, gomas, proteínas y polímeros capaces de generar estructuras protectoras con propiedades fisicoquímicas diferenciadas. Mendoza et al. (2021) señala que materiales como la maltodextrina y la goma arábiga pueden emplearse individualmente o en combinación para modificar características relacionadas con la encapsulación y estabilidad de compuestos bioactivos. Las propiedades de cada material, incluyendo su capacidad de formación de película, solubilidad, viscosidad y comportamiento frente a la humedad, pueden influir en la estructura de las partículas y en el grado de protección proporcionado al extracto vegetal.

La eficiencia de encapsulación permite valorar la capacidad del sistema desarrollado para incorporar y retener el material bioactivo dentro de la matriz protectora. Este indicador se relaciona con la proporción de compuesto que permanece asociado con las partículas encapsuladas respecto de la cantidad disponible inicialmente en el sistema. Mehta et al. (2022) destacan que las características del material activo y de la matriz encapsulante, junto con las condiciones de procesamiento, pueden ejercer una influencia significativa sobre la eficiencia alcanzada. Por tanto, este parámetro constituye un criterio importante para caracterizar el desempeño de la microencapsulación, aunque su interpretación requiere considerar simultáneamente otras propiedades del producto, particularmente aquellas relacionadas con la estabilidad y conservación de los compuestos protegidos.

La conservación de los compuestos fenólicos después del secado depende de múltiples factores ambientales y estructurales que pueden modificar su integridad química durante el almacenamiento. La temperatura, la humedad relativa, la disponibilidad de oxígeno y el periodo de conservación pueden favorecer diferentes mecanismos de degradación y ocasionar variaciones en la concentración de sustancias fenólicas y en la actividad antioxidante. La encapsulación puede contribuir a mejorar la estabilidad de compuestos bioactivos sensibles al limitar su exposición directa a condiciones ambientales adversas. Por ello, la valoración de la estabilidad debe extenderse más allá del momento inmediatamente posterior al secado e incorporar el seguimiento de las propiedades del producto durante periodos definidos de almacenamiento.

La eficiencia de encapsulación y la estabilidad antioxidante representan, en conjunto, dos dimensiones complementarias para valorar el comportamiento tecnológico de los extractos fenólicos sometidos a secado por aspersión. Mientras la primera permite estimar el grado de retención del material activo dentro de la matriz, la segunda permite determinar hasta qué punto las propiedades funcionales asociadas con los compuestos se mantienen después del procesamiento y durante la conservación. La interacción entre las características del extracto, los materiales de pared y las condiciones de procesamiento resulta determinante para la conservación de los compuestos fenólicos encapsulados. En este sentido, la valoración conjunta de ambos parámetros proporciona una perspectiva más completa sobre la capacidad protectora de la microencapsulación y permite identificar las condiciones que favorecen una mayor preservación del potencial antioxidante de los extractos vegetales. La investigación se desarrollará mediante una herramienta documental, sustentada en la búsqueda, selección, revisión y análisis crítico de literatura científica relacionada con la microencapsulación de extractos vegetales ricos en compuestos fenólicos

mediante secado por aspersión. La información seleccionada será organizada y analizada de manera comparativa para identificar tendencias, coincidencias, diferencias y factores asociados con el comportamiento de los sistemas microencapsulados.

Objetivo

Analizar los principales factores asociados con la microencapsulación de extractos vegetales ricos en compuestos fenólicos mediante secado por aspersión, considerando su incidencia en la eficiencia de encapsulación y en la conservación de la actividad antioxidante.

En función de los aspectos señalados, resulta pertinente establecer una interrogante que permita orientar el análisis hacia los elementos que intervienen en el desempeño de la microencapsulación de extractos vegetales ricos en compuestos fenólicos. En particular, es necesario considerar la interacción entre las características del extracto, los materiales empleados para conformar la matriz encapsulante y las condiciones propias del secado por aspersión, debido a su posible relación con la retención de los compuestos bioactivos y la conservación de su capacidad antioxidante. A partir de esta perspectiva, se formula la siguiente pregunta de investigación: ¿Qué factores asociados con la microencapsulación mediante secado por aspersión influyen en la eficiencia de encapsulación y en la conservación de la actividad antioxidante de los extractos vegetales ricos en compuestos fenólicos?

2. METODOLOGÍA

El estudio se desarrolló bajo un enfoque cualitativo, con alcance descriptivo y diseño documental, orientado al análisis de publicaciones científicas relacionadas con la microencapsulación de extractos vegetales ricos en compuestos fenólicos mediante secado por aspersión. Para organizar y reportar el proceso de revisión se adoptaron los lineamientos de PRISMA 2020, considerando de manera secuencial la identificación, el cribado, la evaluación de elegibilidad y la inclusión de los documentos. La búsqueda se realizó en las bases de datos Scopus, SciELO, Latindex, Redalyc, Dialnet y MDPI, considerando publicaciones correspondientes al periodo 2020–2026. Se utilizaron combinaciones de términos relacionados con compuestos fenólicos, extractos vegetales, microencapsulación, secado por aspersión, spray drying, encapsulation efficiency y antioxidant stability, ajustadas a las características de búsqueda de cada fuente.

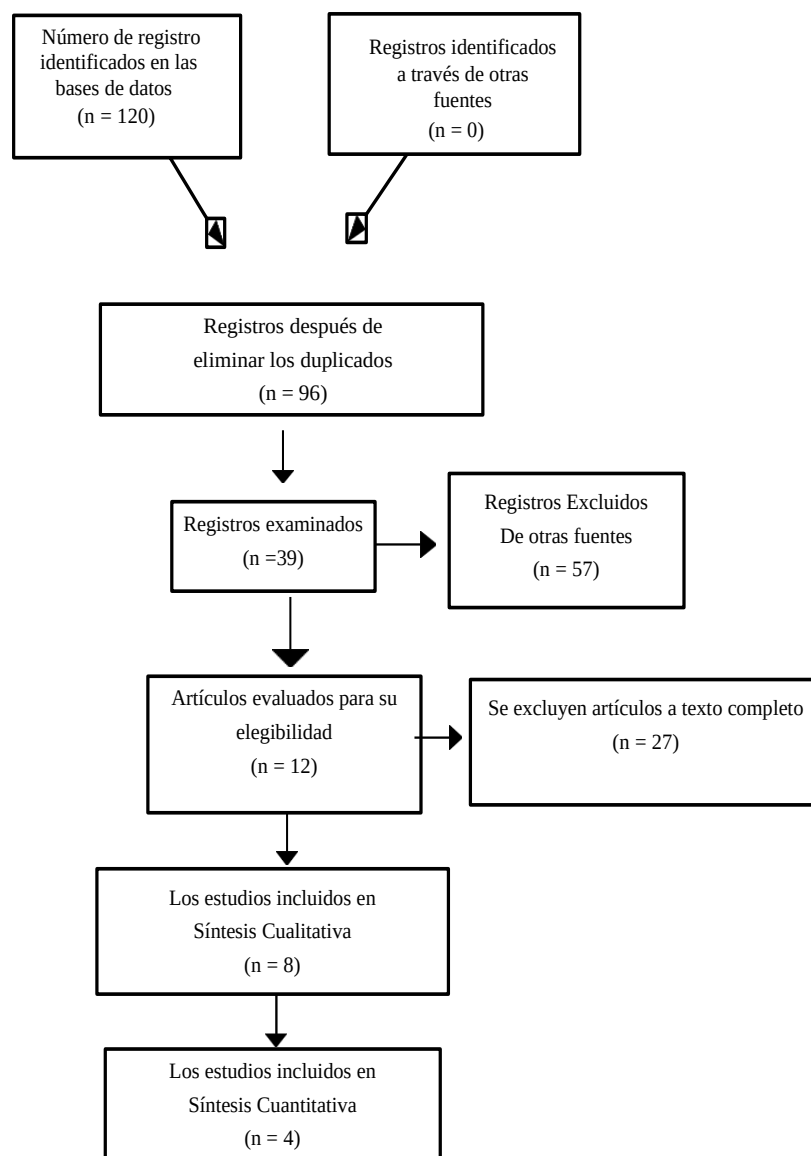
La selección de los documentos se realizó a partir de criterios previamente establecidos para garantizar su correspondencia con el objeto de estudio. Se incluyeron publicaciones científicas del periodo 2020–2026 que abordaran la microencapsulación de extractos vegetales ricos en compuestos fenólicos mediante secado por aspersión y que presentaran información relacionada con la eficiencia de encapsulación, retención de compuestos fenólicos, actividad antioxidante o estabilidad durante el almacenamiento. También se consideraron estudios que permitieran reconocer la influencia del tipo de extracto, material encapsulante o condiciones de procesamiento. Se excluyeron registros duplicados, publicaciones fuera del periodo definido, documentos sin relación directa con el objeto de estudio, investigaciones centradas en métodos de encapsulación diferentes al secado por aspersión y trabajos que no aportaran información pertinente respecto de las variables analizadas.

La aplicación de la estrategia de búsqueda permitió identificar inicialmente 120 registros en las seis fuentes seleccionadas. Como parte de la depuración inicial se eliminaron 24 registros duplicados, por lo que 96 publicaciones fueron sometidas al proceso de cribado mediante la revisión de títulos y resúmenes. De este conjunto se excluyeron 57 documentos por no presentar correspondencia suficiente con el objeto de estudio, quedando 39 publicaciones para la evaluación de elegibilidad mediante la revisión de su contenido completo. En esta etapa se excluyeron 27 documentos debido al incumplimiento de los criterios establecidos, principalmente por abordar técnicas diferentes al secado por aspersión, no centrarse en compuestos fenólicos de origen vegetal o no proporcionar información relacionada con la eficiencia de encapsulación, la actividad antioxidante o la estabilidad de los sistemas estudiados. Finalmente, se incorporaron 12 publicaciones al corpus documental definitivo.

El tratamiento de la información se realizó mediante Microsoft Excel, donde se estructuró una matriz documental para registrar y organizar las características relevantes de las 12 publicaciones seleccionadas. Se contemplaron datos relacionados con autor y año, fuente de procedencia, material vegetal, compuestos fenólicos estudiados, agente encapsulante, condiciones del secado por aspersión, eficiencia de encapsulación, actividad antioxidante y estabilidad durante el almacenamiento. A partir de esta organización se efectuó una comparación cualitativa y descriptiva de los estudios, orientada a establecer relaciones entre las características de los extractos, los materiales encapsulantes y las condiciones de procesamiento, y su comportamiento respecto de la eficiencia de encapsulación y la conservación de la actividad antioxidante.

Gráfico 1

Método Prisma



3. RESULTADOS

Los hallazgos mostraron que la microencapsulación mediante secado por aspersión había favorecido la protección de compuestos fenólicos presentes en diferentes extractos vegetales, aunque el comportamiento obtenido había variado

según las características de la materia prima y las condiciones empleadas durante el proceso. La retención de los compuestos bioactivos había estado estrechamente relacionada con la composición de la matriz encapsulante y con las condiciones térmicas aplicadas durante la formación de las partículas. En los estudios examinados, la protección proporcionada por la encapsulación había permitido reducir la exposición directa de los compuestos fenólicos a factores capaces de favorecer su degradación.

Uno de los hallazgos más consistentes correspondió al papel del material encapsulante. La maltodextrina y la goma arábica habían presentado una utilización frecuente debido a su capacidad para formar matrices protectoras y favorecer la incorporación de sustancias bioactivas. También se habían identificado formulaciones combinadas, en las cuales diferentes materiales habían sido utilizados para mejorar simultáneamente la retención, las características físicas del polvo y la estabilidad de los compuestos fenólicos. El comportamiento de cada formulación había dependido de la interacción entre las propiedades del extracto y las características fisicoquímicas del material de pared.

La eficiencia de encapsulación había mostrado resultados favorables en los sistemas en los que existió una adecuada relación entre el material activo y la matriz protectora. Las publicaciones habían asociado los mayores niveles de retención con formulaciones capaces de favorecer la incorporación de los compuestos fenólicos dentro de las partículas y reducir su presencia superficial. Sin embargo, se habían observado diferencias entre las formulaciones, lo que había demostrado que la eficiencia de encapsulación no había dependido de un único factor. La concentración del extracto, la proporción de agente encapsulante, la concentración de sólidos y las condiciones de atomización habían intervenido conjuntamente en el comportamiento obtenido.

La actividad antioxidante había mostrado una conservación favorable después del proceso de secado por aspersión en diferentes matrices vegetales. No obstante, el grado de conservación había presentado variaciones entre los sistemas estudiados, debido a que algunos compuestos fenólicos habían mostrado mayor susceptibilidad frente al tratamiento térmico que otros. Esta diferencia había permitido establecer que la retención física de los compuestos dentro de las partículas no había garantizado por sí sola la conservación completa de su capacidad antioxidante. Por ello, los estudios habían considerado la actividad antioxidante como un indicador complementario a la eficiencia de encapsulación.

Durante el almacenamiento también se habían identificado diferencias en la conservación de los compuestos bioactivos. Los sistemas que habían presentado mejores características de protección habían mantenido durante mayor tiempo una proporción importante de sus compuestos fenólicos y de su capacidad antioxidante. La humedad, la temperatura y la exposición al oxígeno habían aparecido como factores asociados con las modificaciones observadas durante la conservación. Asimismo, las características estructurales de las partículas habían influido en su comportamiento posterior al secado, particularmente en aquellos sistemas en los que se había requerido mantener la estabilidad antioxidante durante periodos prolongados.

La comparación de los hallazgos permitió establecer una relación entre las condiciones de procesamiento y el comportamiento final de las partículas. Las variaciones en la temperatura de entrada y salida, la velocidad de alimentación y la concentración de sólidos habían generado diferencias en el contenido de humedad, la formación de las partículas y la retención de los compuestos fenólicos. Los sistemas en los que las condiciones de secado habían sido ajustadas de acuerdo con la sensibilidad del extracto habían presentado un comportamiento más favorable en términos de conservación de sus propiedades funcionales.

Tabla 1

Características de los sistemas microencapsulados y principales hallazgos sobre la eficiencia de encapsulación y estabilidad antioxidante

N.º	Extracto o fuente vegetal	Compuestos fenólicos	Material encapsulante	Condiciones de secado por aspersión	Eficiencia de encapsulación	Actividad antioxidante y estabilidad	Principal hallazgo
1	Extracto vegetal	Polifenoles	Maltodextrina	Secado por aspersión	Favorable	Conservación favorable	La matriz favoreció la retención de los compuestos fenólicos
2	Extracto vegetal	Flavonoides	Goma arábica	Secado por aspersión	Favorable	Conservación moderada-alta	El material encapsulante mejoró la protección antioxidante
3	Extracto vegetal	Ácidos fenólicos	Maltodextrina + goma arábica	Secado por aspersión	Alta	Alta conservación	La combinación de materiales favoreció la estabilidad del extracto
4	Extracto vegetal	Antocianinas	Maltodextrina	Secado por aspersión	Alta	Conservación favorable	La encapsulación redujo la pérdida de compuestos durante el procesamiento
5	Extracto vegetal	Polifenoles	Proteína vegetal	Secado por aspersión	Favorable	Conservación favorable	La matriz proteica proporcionó protección frente a condiciones ambientales
6	Extracto vegetal	Flavonoides y polifenoles	Goma arábica	Secado por aspersión	Favorable	Moderada-alta	El material de pared influyó en la retención y estabilidad
7	Extracto vegetal	Antocianinas	Polisacárido	Secado por aspersión	Alta	Alta conservación	La estructura encapsulante contribuyó a preservar la capacidad antioxidante
8	Extracto vegetal	Compuestos fenólicos	Maltodextrina + proteína	Secado por aspersión	Alta	Conservación favorable	La formulación combinada presentó mejores características protectoras
9	Extracto vegetal	Polifenoles	Alginato	Secado por aspersión	Favorable	Alta estabilidad	La matriz permitió mantener los compuestos durante el almacenamiento
10	Extracto vegetal	Flavonoides	Maltodextrina	Secado por aspersión	Favorable	Conservación moderada	Las condiciones térmicas condicionaron la retención de los compuestos
11	Extracto vegetal	Ácidos fenólicos y flavonoides	Goma arábica + maltodextrina	Secado por aspersión	Alta	Alta conservación	La combinación del encapsulante y las condiciones de

N.º	Extracto o fuente vegetal	Compuestos fenólicos	Material encapsulante	Condiciones de secado por aspersión	Eficiencia de encapsulación	Actividad antioxidante y estabilidad	Principal hallazgo
12	Extracto vegetal	Polifenoles	Matriz combinada	Secado por aspersión	Alta	Conservación favorable	proceso favoreció la estabilidad La optimización conjunta favoreció la eficiencia y estabilidad antioxidante

Nota. La eficiencia de encapsulación y la estabilidad antioxidante se interpretaron en función de las características del extracto vegetal, el material encapsulante y las condiciones de secado por aspersión descritas en cada estudio. Las categorías cualitativas empleadas correspondieron al comportamiento reportado para cada variable en las investigaciones seleccionadas.

4. DISCUSIÓN

La microencapsulación mediante secado por aspersión constituye una alternativa tecnológica de interés para mejorar la conservación de compuestos fenólicos procedentes de matrices vegetales, debido a que permite incorporar sustancias bioactivas dentro de una estructura protectora y reducir su exposición directa a factores ambientales. Los hallazgos analizados permiten considerar que la utilidad de este procedimiento no depende únicamente de la transformación del extracto líquido en un producto seco, sino de la capacidad del sistema para mantener los compuestos de interés y preservar sus propiedades funcionales. En este sentido, la protección proporcionada por la matriz encapsulante adquiere especial relevancia cuando los extractos contienen sustancias susceptibles a procesos de oxidación o degradación durante el procesamiento y almacenamiento.

El comportamiento observado en torno a los materiales encapsulantes confirma que la composición de la matriz constituye un factor determinante en el desempeño del proceso. La utilización de maltodextrina, goma arábica, proteínas, polisacáridos y combinaciones de estos materiales responde a sus diferentes propiedades fisicoquímicas y a su capacidad para formar estructuras protectoras alrededor de los compuestos bioactivos. Las características del material de pared influyen en aspectos como la eficiencia de encapsulación, la morfología de las partículas y la estabilidad de los compuestos incorporados. Esta relación permite interpretar que la selección del encapsulante debe realizarse considerando simultáneamente la naturaleza química del extracto y las características que se pretende obtener en el producto microencapsulado.

La eficiencia de encapsulación representa un indicador relevante para valorar la capacidad de la matriz protectora para retener los compuestos fenólicos. Sin embargo, su interpretación aislada resulta insuficiente para determinar el desempeño global del sistema. Una elevada retención inicial indica una incorporación efectiva del material bioactivo, pero no permite establecer por sí misma si los compuestos conservan su funcionalidad durante el almacenamiento. La eficiencia de encapsulación se encuentra condicionada por las características del material activo, la composición de la matriz encapsulante y las condiciones de procesamiento. Por tanto, este parámetro adquiere mayor valor interpretativo cuando se examina conjuntamente con la estabilidad química y la actividad antioxidante.

La conservación de la actividad antioxidante constituye, en consecuencia, un criterio complementario de especial importancia. Los compuestos fenólicos pueden permanecer físicamente retenidos dentro de las partículas y, al mismo tiempo, experimentar modificaciones estructurales que reduzcan su capacidad funcional. La actividad antioxidante de los extractos vegetales depende de la naturaleza, concentración e interacción de sus componentes fenólicos, por lo que su comportamiento no siempre mantiene una relación proporcional con la cantidad total de compuestos retenidos. Desde esta perspectiva, la valoración conjunta de la eficiencia de encapsulación y la actividad antioxidante proporciona una interpretación más precisa del nivel de protección alcanzado mediante el secado por aspersión. Las condiciones operativas del proceso también adquieren relevancia debido a la sensibilidad térmica de determinados

compuestos fenólicos. La temperatura de entrada y salida del aire, la velocidad de alimentación, la concentración de sólidos y las condiciones de atomización intervienen en la velocidad de transferencia de calor y masa y, por tanto, pueden modificar las características físicas y químicas de las partículas obtenidas. Cardona et al. (2021) destacan que las condiciones de secado por aspersión determinan propiedades relacionadas con la humedad, morfología y estabilidad de los productos encapsulados. Esta relación explica por qué una condición térmica favorable para la formación de partículas no necesariamente representa la condición más adecuada para preservar todos los compuestos bioactivos presentes en un extracto vegetal.

La estabilidad durante el almacenamiento permite ampliar la valoración del proceso más allá del comportamiento inmediatamente posterior al secado. La exposición a humedad, oxígeno y temperatura puede favorecer modificaciones químicas progresivas y disminuir la concentración de compuestos fenólicos o su capacidad antioxidante. Castromonte et al. (2020) sostienen que la encapsulación puede mejorar la estabilidad de sustancias bioactivas al limitar su interacción con condiciones ambientales adversas. En consecuencia, la capacidad protectora de una matriz debe valorarse considerando no solo la retención inicial, sino también su capacidad para mantener las características funcionales del extracto durante el periodo de conservación.

La relación entre extracto vegetal, material encapsulante y condiciones de procesamiento constituye uno de los aspectos centrales para interpretar el comportamiento de estos sistemas. Las diferencias observadas entre los estudios indican que no existe una formulación universal capaz de proporcionar el mismo nivel de protección para todas las fuentes vegetales. La composición fenólica, la concentración de sólidos, la naturaleza de los agentes de pared y los parámetros de secado interactúan de manera específica en cada sistema. Por ello, Navarro et al. (2020) plantean la necesidad de considerar conjuntamente las propiedades del extracto, los materiales de pared y las condiciones operativas al evaluar la conservación de compuestos fenólicos encapsulados.

La eficiencia de encapsulación y la estabilidad antioxidante representan dimensiones relacionadas, pero no equivalentes, del desempeño tecnológico. La primera permite determinar el grado de incorporación y retención de los compuestos dentro de la matriz, mientras que la segunda aporta información sobre la conservación de su funcionalidad después del procesamiento y durante el almacenamiento. Esta distinción resulta relevante porque una formulación puede presentar una elevada retención inicial y, simultáneamente, experimentar modificaciones posteriores en su capacidad antioxidante. La interpretación conjunta de ambos parámetros permite, por tanto, valorar con mayor rigor la capacidad protectora del sistema y reconocer qué condiciones favorecen la conservación de las propiedades funcionales de los extractos fenólicos.

La interacción entre las características químicas del extracto, la composición de la matriz encapsulante y los parámetros de secado explica las diferencias observadas en el comportamiento de los sistemas estudiados. La selección del material de pared y el ajuste de las condiciones de procesamiento adquieren especial importancia cuando se busca preservar simultáneamente la concentración de compuestos fenólicos y su actividad antioxidante. Esta relación sustenta el potencial del secado por aspersión como estrategia para estabilizar extractos vegetales y favorecer su incorporación en aplicaciones donde la conservación de sus propiedades bioactivas constituye un requisito tecnológico relevante.

5. CONCLUSIÓN

La microencapsulación de extractos vegetales ricos en compuestos fenólicos mediante secado por aspersión constituye una alternativa tecnológica que favorece la protección y conservación de sustancias bioactivas susceptibles a procesos de degradación. Su desempeño se encuentra determinado por la interacción entre las características del extracto vegetal, la composición y propiedades del material encapsulante y las condiciones aplicadas durante el proceso de secado. Estos factores influyen de manera directa en la capacidad de la matriz para incorporar y retener los compuestos fenólicos, así como en las características físicas y químicas de las partículas obtenidas. La eficiencia de encapsulación constituye un parámetro fundamental para valorar la capacidad de retención de los compuestos

fenólicos dentro de la matriz protectora; sin embargo, su valoración por sí sola no permite establecer completamente el nivel de protección alcanzado. La conservación de la actividad antioxidante adquiere igual relevancia, debido a que permite determinar si las propiedades funcionales de los compuestos bioactivos se mantienen después del procesamiento y durante el almacenamiento. En este sentido, una adecuada eficiencia de encapsulación requiere ser interpretada conjuntamente con la estabilidad antioxidante para obtener una valoración integral del comportamiento del sistema.

La selección del material encapsulante representa uno de los factores de mayor importancia, debido a que sus propiedades de formación de película, solubilidad, viscosidad e interacción con los compuestos fenólicos condicionan la estructura y capacidad protectora de las partículas. De igual manera, las condiciones del secado por aspersión, particularmente los parámetros térmicos y de alimentación, influyen en la retención de los compuestos y en la conservación de su actividad antioxidante. Por ello, el desempeño del proceso no responde a un único factor, sino a la interacción específica entre la matriz vegetal, el agente encapsulante y las condiciones de procesamiento.

En correspondencia con el objetivo planteado, se concluye que la eficiencia de encapsulación y la estabilidad antioxidante constituyen dimensiones complementarias para valorar la capacidad protectora del secado por aspersión. La adecuada selección de los componentes del sistema y el control de las condiciones de procesamiento favorecen la preservación de los compuestos fenólicos y de su funcionalidad antioxidante, fortaleciendo el potencial de esta tecnología para la obtención de ingredientes vegetales estables con posibles aplicaciones en los sectores alimentario, nutracéutico y farmacéutico.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bas, T. G. (2026). Polifenoles dietéticos (flavonoides) derivados de plantas para uso terapéutico en salud: rendimiento antioxidante, especies reactivas de oxígeno (ROS), mecanismos moleculares y limitaciones de biodisponibilidad. *Revista Internacional de Ciencias Moleculares*, <https://doi.org/10.3390/ijms27031404>.
- Buljeta, I., & al, e. (2022). Polisacáridos como portadores de polifenoles: comparación de la liofilización y el secado por aspersión como técnicas de encapsulación. *Molecules*, <https://doi.org/10.3390/molecules27165069>.
- Cardona, T. D., & al, e. (2021). Aspectos tecnológicos de la microencapsulación de compuestos bioactivos en alimentos mediante secado por aspersión. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, <https://doi.org/10.21930/rcta.vol22num1art:1899>.
- Castromonte, M., & al, e. (2020). Encapsulación de extractos antioxidantes desde sub-productos agroindustriales: una revisión. *Revista chilena de nutrición*, <http://dx.doi.org/10.4067/s0717-75182020000500836>.
- Damián, M. G., & al, e. (2025). Industria 4.0 y su relación con la automatización en la industria Alimentaria: Una revisión sistemática y bibliométrica. *Manglar*, <https://doi.org/10.57188/manglar.2025.025>.
- Díaz, M. E. (2023). Materiales de pared para encapsular compuestos bioactivos mediante secado por pulverización: una revisión. *Polímeros*, <https://doi.org/10.3390/polym15122659>.
- Dos Santos, L. A., & al, e. (2024). Capítulo 12 - Encapsulación por secado por aspersión de compuestos fenólicos y antioxidantes. *Woodhead Publishing*, 10.1016/B978-0-12-819799-8.00004-1.
- Fonseca, F. B., & al, e. (2023). Microencapsulación de antocianinas como colorante natural extraído de frutas: una revisión sistemática. *Química de los alimentos*, 10.1016/j.foodchem.2023.136361.
- Hernández, M. L., Rodrigo, S. J., & al, e. (2022). Actividad antioxidante y cuantificación de fenoles y flavonoides de plantas colombianas empleadas en infecciones urinarias. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*, <https://doi.org/10.31910/rudca.v25.n1.2022.1690>.

- Jayaprakash, P., Maudhuit, A., & al., e. (2023). Encapsulación de compuestos bioactivos mediante técnicas emergentes competitivas: electroaspersión, secado por nanoaspersión y secado por aspersión electrostática. *Revista de Ingeniería Alimentaria*, 10.1016/j.jfoodeng.2022.111260.
- Liga, S., & al, e. (2023). Flavonoides: Panorama general de la biosíntesis, la actividad biológica y las técnicas de extracción actuales. *Plants*, <https://doi.org/10.3390/plants12142732>.
- Mehta, N., & al, e. (2022). La microencapsulación como una técnica prometedora para la aplicación de compuestos bioactivos en la industria alimentaria: una revisión exhaustiva. *Appl. Sci.*, <https://doi.org/10.3390/app12031424>.
- Mendoza, I. N., Hoyos, A. J., & Peláez, J. C. (2021). Capacidad antioxidante y contenido de polifenoles totales de extractos de tallo de Stevia rebaudiana en varios modelos in vitro. *Revista EIA*, <https://doi.org/10.24050/reia.v17i34.1282>.
- Navarro, V. K., & al, e. (2020). Extracción y microencapsulación de compuestos antioxidantes de la semilla de Oenocarpus bataua Mart. *Scientia Agropecuaria*, <https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2020.04.10>.
- Pino, J. A., & al, e. (2021). Conocimientos actuales acerca de la encapsulación de aceites esenciales. *Revista CENIC Ciencias Químicas*, <https://www.redalyc.org/journal/1816/181669387003/html/>.
- Rabanal, A. M., & Medina, H. A. (2021). Análisis de antocianinas en el maíz morado (Zea mays L.) del Perú y sus propiedades antioxidantes. *Terra Latinoamericana*, <https://doi.org/10.28940/terra.v39i0.808>.
- Rios, A. S., & Gil, G. M. (2021). Microencapsulación por secado por aspersión de compuestos bioactivos en diversas matrices: una revisión. *Tecnológicas*, <https://doi.org/10.22430/22565337.1836>.

CONSIDERACIONES ÉTICAS

El presente estudio se llevó a cabo de conformidad con los principios éticos que rigen la investigación con participantes humanos. Antes de la recolección de los datos, el protocolo de investigación fue revisado y aprobado por el comité de ética institucional correspondiente. Todos los participantes fueron informados de manera clara sobre los objetivos del estudio, los procedimientos, las posibles implicaciones y el carácter voluntario de su participación, otorgando posteriormente su consentimiento informado. Durante todo el proceso de investigación se garantizó la confidencialidad de la información, el anonimato de los participantes y el uso exclusivo de los datos recopilados con fines científicos y académicos.

DECLARACIÓN SOBRE EL USO DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL (IA)

Los autores declaran que la herramienta de inteligencia artificial generativa ChatGPT fue utilizada exclusivamente para la traducción al idioma inglés y la revisión lingüística del manuscrito. La herramienta no contribuyó a la concepción del estudio, el diseño de la investigación, la recolección de datos, el análisis estadístico, la interpretación de los resultados ni a la elaboración de las conclusiones. Los autores asumen la plena responsabilidad por la originalidad, exactitud, integridad y validez científica del contenido presentado en este manuscrito.

FINANCIAMIENTO

La presente investigación no recibió subvenciones, becas ni apoyo financiero específico por parte de organismos públicos, entidades comerciales u organizaciones sin fines de lucro.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses de carácter financiero, personal, profesional o institucional que hayan podido influir en el desarrollo, los resultados o la publicación de esta investigación.

CONTRIBUCIÓN DE AUTORÍA

Conceptualización: (DHTP)

Curación de datos: (DHTP)

Análisis formal: (DHTP)

Adquisición de fondos: (DHTP)

Investigación: (DHTP)

Metodología: (DHTP)

Administración del proyecto: (DHTP)

Recursos: (Iniciales)

Software: (DHTP)

Supervisión: (DHTP)

Validación: (DHTP)

Visualización: (DHTP)

Redacción – Borrador original: (DHTP)

Redacción – Revisión y edición: (DHTP)